

wg

Kernenergie meer een Zegen dan een Ramp

Schrijvers moeten in deze opzet van uitgeven zelf de correctie op het zetwerk uitvoeren. Door de werking van het geheugen, dat nogal eens afgaat op eerder gemaakte herinneringen, blijven er wel eens zetfoutjes ongezien bij de controle. Dat doet echter géén afbreuk aan de inhoud.

De inhoud is van meer belang dan grammatica en stijl. Die beiden zijn ook nog eens steeds aan verandering onderhevig

Afbeeldingen zijn verkregen via: rechten vrij

© William Geller

ISBN nummer: 9789464353426

Mei 2021

William Geller

Kernenergie meer een Zegen dan een Ramp

1 Een werkje over Kernenergie kan maar het beste begonnen worden met uit te leggen wat die energiesoort inhoud. Kernenergie of nucleaire energie is energie opgewekt door kernreacties, de reacties waarbij atoomkernen zijn betrokken. Kernenergie komt in alle gevallen beschikbaar in de vorm van warm-

te, die in een kerncentrale op conventionele manier (via stoom, turbines en generatoren) in elektriciteit wordt omgezet.

Ondanks de zeer beperkte uitstoot van CO₂ (waardoor deze energiebron bijdraagt aan het beperken van de opwarming van de aarde) is kernenergie geen onomstreden energiebron, voornamelijk door de veiligheidsrisico's en het overblijvende kernafval. Die veiligheidsrisico's ontstaan vrijwel altijd door menselijke fouten die weer meest te maken hebben met winstbejag en onkunde. De politiek speelt daar vaak een grote en kwalijke rol in. Kernenergie is ongrijpbaar voor politici. Het is al moeilijk genoeg voor ervaren natuurkundigen laat staan dat politieke jagers op persoonlijke macht daar iets van begrijpen.

Op 1 januari 2021 waren er wereldwijd 442 kernreactoren operationeel. Ze produceren samen 10,3% van de elektriciteit in de wereld. Daarnaast hebben veel onderzeeërs nucleaire aandrijving alsook enkele atoomijsbrekers.

Ruwweg kunnen we kernenergie verdelen in twee soorten: Kernsplitsing (of kernsplijting) en Kernfusie.

Het hart van een onderzoeksreactor voor kernsplijting wordt gevormd door de splijt- en regelstaven in een waterbassin. Een blauwe gloed ontstaat door het Tsjerenkov-effect.

Door het Tsjerenkov-effect ontstaat er elektromagnetische straling als een elektrisch geladen deeltje zich door een medium voortplant met een snelheid groter dan de fasesnelheid van het licht in dat medium. Deze Tsjerenkovstraling is goed zichtbaar in foto's van kernreactoren, waarbij duidelijk een blauwe gloed waar te nemen is. Het effect is genoemd naar Pavel Tsjerenkov, de natuurkundige die in 1958 de Nobelprijs voor de Natuurkunde kreeg voor de ontdekking van dit effect.

Atoomkernen met een massa overeenkomend met die van ijzer (ca. 56 nucleonen) zijn energetisch gezien van alle kernen in het periodiek systeem het stabielst. Bij zwaardere of lichtere

kernen is het theoretisch mogelijk energiewinst te halen door het samenvoegen van lichte (kernfusie) of het splijten van zware kernen (kernsplijting). De nieuwe atoomkernen die hierbij ontstaan, zijn samen wat lichter dan de som van de uitgangselementen. De ontbrekende massa is omgezet in energie volgens de beroemde formule van Einstein,

waarin

- E = energie
- m = massa
- c^2 = de lichtsnelheid in vacuüm in het kwadraat

Omdat de term c^2 zo groot is, komt er bij kernreacties zeer veel energie vrij, ook als maar een klein gedeelte (een tiende procent) van de massa in energie wordt omgezet. In de praktijk wordt vrijwel alleen gebruikgemaakt van de splijting van kernen van uranium- en plutonium-isotopen. Plutonium ontstaat vanzelf uit uranium tijdens de kernreacties in de reactorkern en wordt ook gedeeltelijk gespleten, waarbij natuurlijk ook energie vrijkomt. Gebruikte splijtstof kan voor circa 95% hergebruikt worden, men spreekt van opwerking. De overige procenten, en de materialen die als verpakking hebben gediend van de splijtingsmaterialen en die ook in meerdere of mindere mate radioactief zijn geworden, vormen samen het zogenoemde kernafval.

Kerncentrale

De commerciële opwekking van elektriciteit door middel van kernenergie gebeurt in kerncentrales. De warmte van het kernsplijtingsproces wordt gebruikt om water te verhitten tot superkritische temperaturen. Daarmee wordt stoom geproduceerd, die een turbine (soort schoepenrad) die vervolgens een generator aandrijft waarin elektriciteit wordt opgewekt. De productie van elektriciteit uit kernenergie was wereldwijd

2518 TWh in 2011, wat neerkomt op 13,5% van de totale productie van elektriciteit. Wereldwijd zijn er in 2020 circa 50 nieuwe kernreactoren in aanbouw in 15 landen.



Een

Kerncentrale

Noord-Amerika

Canada heeft 19 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 15% van de elektriciteit van het land. Op een na staan alle 19 kernreactoren van het land in Ontario. Tien van die eenheden - zes in Bruce en vier in Darlington - zullen worden gerenoveerd. Het programma verlengt de operationele levensduur met 30-35 jaar. Dankzij vergelijkbare renovatiewerkzaamheden kon Ontario in 2014 steenkool geleidelijk afschaffen, waardoor een van de schoonste elektriciteitsmixen ter wereld werd bereikt.

Mexico heeft twee werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 4,5% van de elektriciteit van het land.

De Verenigde Staten hebben 94 werkende kernreactoren, met een gecombineerd nettocapaciteit van 96,6 GW. In 2019 produceerde kernenergie 20% van de elektriciteit van het land. Er waren vier AP1000-reactoren in aanbouw, maar twee daarvan zijn geannuleerd. Een van de redenen voor het feit dat er tot nu toe geen nieuwbouw in de VS is gebouwd, is de uiterst succesvolle evolutie in onderhoudsstrategieën. In de afgelopen 15 jaar heeft de verbeterde operationele prestatie het gebruik van Amerikaanse kerncentrales vergroot, waarbij de verhoogde output gelijk staat aan 19 nieuwe 1000 MWe-centrales die worden gebouwd. In 2016 werd de eerste nieuwe kernreactor in gebruik genomen in het land sinds 20 jaar. Desondanks is het aantal werkende reactoren de afgelopen jaren afgenomen, vanaf een piek van 104 in 2012. Vroegtijdige sluitingen zijn veroorzaakt door een combinatie van factoren, waaronder goedkoop aardgas, liberalisering van de markt, overmatige subsidie van hernieuwbare bronnen en politiek campagne voeren.

Zuid-Amerika

Argentinië heeft drie reactoren. In 2019 wekte het land 6% van zijn elektriciteit op uit kernenergie. Brazilië heeft twee reactoren. In 2019 produceerde kernenergie 3% van de elektriciteit van het land.

West-Europa

In België zijn twee kerncentrales voor elektriciteitsproductie: Doel (4 reactoren) en Tihange (3 reactoren). Samen zorgden zij in 2013 voor 52,08% van de Belgische elektriciteit.

Het Studiecentrum voor Kernenergie SCK•CEN in Mol werd opgericht in 1952. Het SCK•CEN beschikt over een park van meerdere onderzoeksreactoren.

Finland heeft vier werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 35% van de elektriciteit van het land.

Een vijfde reactor - een EPR van 1720 MWe - is in aanbouw en er zijn plannen om op een nieuwe locatie (Hanhikivi) een Russische VVER-1200-eenheid te bouwen.

Frankrijk heeft 58 reactoren, verdeeld over 19 elektriciteitscentrales. Samen zijn deze goed voor 416 TWh per jaar. Dat is 71% van de elektriciteitsproductie in Frankrijk (2019). Een nieuwe Europese kernreactor (EPR) is in aanbouw in Flamanville.

In Nederland zijn twee kerncentrales gebouwd, in Dodewaard (gesloten in 1997) en in Borssele. Die laatste is nog in werking en is goed voor 3,9 procent van de Nederlandse productie van stroom. In 2013 werd door staatssecretaris Pieter van Geel besloten de kerncentrale van Borssele open te houden tot 2033.

In Duitsland produceerde kernenergie in 2019 12,5% van de elektriciteit van het land. Als onderdeel van de Energiewende wil Duitsland stoppen met kernenergie.

Spanje heeft zeven werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 21% van de elektriciteit van het land.

Zweden heeft zes werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 34% van de elektriciteit van het land. Het land sluit enkele oudere reactoren, maar investeert in verlengingen en verbeteringen van de levensduur.

Zwitserland heeft vier werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 24% van de elektriciteit van het land.

Het Verenigd Koninkrijk heeft 15 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 16% van de elektriciteit van het land. De Britse overheid besloot in 2006 tot de

vervanging van verouderde kernreactoren en de bouw van een nieuwe kerncentrale.

Centraal- en Oost-Europa

Armenië heeft één kernreactor. In 2019 produceerde kernenergie 28% van de elektriciteit van het land.

Bulgarije heeft twee werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 38% van de elektriciteit van het land.

Hongarije heeft vier werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 49% van de elektriciteit van het land.

Roemenië heeft twee werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 19% van de elektriciteit van het land.

Rusland heeft 38 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 20% van de elektriciteit van het land.

Een regeringsbesluit in 2016 voorzag in de bouw van 11 kernreactoren tegen 2030, naast de reeds in aanbouw zijnde reactoren. Begin 2020 had Rusland vier reactoren in aanbouw.

De nucleaire industrie van het land is momenteel betrokken bij nieuwe reactorprojecten in Wit-Rusland, China, Hongarije, India, Iran en Turkije, en in verschillende mate als investeerder in Algerije, Bangladesh, Bolivia, Indonesië, Jordanië, Kazachstan, Nigeria, Zuid-Afrika,

Slowakije heeft vier werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 54% van de elektriciteit van het land. Er zijn nog twee units in aanbouw.

Slovenië heeft één werkende kernreactor. In 2019 produceerde Slovenië 37% van zijn elektriciteit uit kernenergie. Oekraïne heeft 15 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 54% van de elektriciteit van het land. Tsjechie heeft zes werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 35% van de elektriciteit van het land. Wit-Rusland heeft één werkende kernreactor, die in novem-

ber 2020 op het net is aangesloten, en een tweede reactor in aanbouw.

Azië

Bangladesh is in 2017 begonnen met de bouw van de eerste van twee geplande Russische VVER-1200-reactoren. De bouw van de tweede startte in 2018. Het is van plan de eerste unit in 2023 in bedrijf te hebben.

Het land produceert momenteel vrijwel al zijn elektriciteit uit fossiele brandstoffen.

China heeft 49 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 5% van de elektriciteit van het land. Het land blijft de markt voor nieuwe nucleaire bouwwerken domineren. Begin 2020 bevonden zich 11 van de 53 reactoren die wereldwijd in aanbouw waren in China. In 2018 werd China het eerste land dat opdracht gaf voor twee nieuwe ontwerpen: de AP1000 en de EPR. China begint met de exportmarketing van de Hualong One, een grotendeels inheems reactorontwerp. De sterke impuls voor de ontwikkeling van nieuwe kernenergie in China komt voort uit de noodzaak om de luchtkwaliteit in steden te verbeteren en de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

India heeft 23 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 3% van de elektriciteit van het land. De Indiase regering zet zich in om haar kernenergiecapaciteit te vergroten als onderdeel van haar omvangrijke programma voor infrastructuurontwikkeling. De regering stelde in 2010 een ambitieuze doelstelling om tegen 2024 14,6 GWe nucleaire capaciteit online te hebben. Begin 2020 waren in India zeven reactoren in aanbouw met een gecombineerd vermogen van 5,3 GWe.

Japan heeft 33 werkende kernreactoren. Aan het begin van 2020 waren slechts negen reactoren actief, en nog eens

17 in de procedure voor goedkeuring voor een herstart, na het ongeval in Fukushima in 2011.

In het verleden was 30% van de elektriciteit van het land afkomstig van kernenergie; in 2019 was dat nog maar 8%.

Zuid-Korea heeft 24 werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 26% van de elektriciteit van het land. Zuid-Korea heeft in eigen land vier nieuwe reactoren in aanbouw en vier in de Verenigde Arabische Emiraten. Het land is ook betrokken bij intensief onderzoek naar toekomstige reactorontwerpen.

Pakistan heeft vijf werkende kernreactoren. In 2019 produceerde kernenergie 7% van de elektriciteit van het land. Pakistan heeft twee Chinese Hualong One-eenheden in aanbouw.

Afrika en het Midden-Oosten

Turkije is in april 2018 begonnen met de bouw van zijn eerste kerncentrale waarvan de ingebruikname in 2023 wordt verwacht.

Zuid-Afrika heeft twee werkende kernreactoren en is het enige Afrikaanse land dat momenteel elektriciteit produceert uit kernenergie. In 2019 produceerde kernenergie 7% van de elektriciteit van het land. Zuid-Afrika blijft zich inzetten voor plannen voor verdere capaciteit al zijn de financieringsbeperkingen aanzienlijk.

Iran heeft één werkende kernreactor. In 2019 produceerde kernenergie 2% van de elektriciteit van het land. Een tweede VVER-1000-eenheid is in aanbouw.

De Verenigde Arabische Emiraten hebben één werkende kernreactor. Nog eens drie eenheden zijn in aanbouw in Barakah.

Er is veel discussie over de invoering en het gebruik van kernenergie, die een hoogtepunt bereikte tijdens de jaren 1970 en 1980. In sommige landen werd dit een verhitte discussie als nooit tevoren.

Voorstanders van kernenergie tonen met wetenschappelijke gegevens aan dat kernenergie een schone en veilige energiebron is, met een CO₂-uitstoot die zelfs onder die van zonnepanelen valt, dat kernenergie in tegenstelling tot de verbranding van fossiele brandstoffen vrijwel geen luchtvervuiling produceert en benadrukken dat de risico's van de reactoren zelf nihil zijn. De opslag van kernafval, hoewel vaak in de pers genoemd, betreft zeer kleine volumes, zeker in vergelijking met fossiele brandstoffen. Deze volumes kunnen verder worden verminderd door gebruik te maken van de nieuwste technologie in nieuwe reactoren, zoals het gebruik van alternatieve brandstofcycli zoals de snelle kweekreactor. Dezelfde voorstanders wijzen er ook op dat de energievoorziening hiermee minder afhankelijk wordt van fossiele brandstoffen uit instabiele regio's.

Tegenstanders van kernenergie beweren dat deze vorm van energieopwekking vele bedreigingen voor mens en milieu met zich meebrengt. Deze bedreigingen zijn de gezondheidsrisico's, het vrijkomen van radioactieve stoffen na kernrampen zoals in Tsjernobyl en Fukushima en de milieuschade als gevolg van uraniumwinning.

Verder zijn, aldus de tegenstanders, de verwerking en het vervoer van de kernbrandstof, het risico van verspreiding van kernwapens, sabotage en het onopgeloste probleem van radioactief afval nadelig. Critici twijfelen aan de veiligheid van kerncentrales en wijzen op eerdere ernstige rampen. Zij geloven niet dat de risico's voldoende verminderd kunnen worden door nieuwe technologie. Daarnaast wijzen zij erop dat, wanneer men de gehele keten van kernenergie van de ura-

niumwinning tot de ontmanteling van kerncentrales in aanmerking neemt, kernenergie geen duurzame energiebron is.

In 2019 publiceerde de Duitse economische denktank DIW een onderzoek waaruit bleek dat kernenergie nergens op de wereld ooit winstgevend was. Stuk voor stuk zijn de centrales alle verliesgevend. Gedurende een 40-jarige levensduur was er gemiddeld 5 miljard euro verlies. Daarop komen dan nog de kosten van ontmanteling, en de langdurige opslag van radioactief afval. Zelfs bij voortdurend hoge energieprijzen is het verlies van een centrale nog steeds iets van 1,5 miljard euro. Volgens Christian von Hirschhausen, de chef-onderzoeker van deze studie, werd kernenergie nooit ontwikkeld om op commerciële wijze energie op te wekken, maar was het vooral bedoeld voor de productie van kernwapens. Nieuwe kerncentrales worden almaar duurder. Denktank DIW meldt daarboven het gevaar van het vrijkomen van nucleaire straling bij ongelukken, zoals die in Harrisburg (1977), Tsjernobyl (1986), en Fukushima (2011). "Het gebrek aan economische efficiency gaat hand in hand met een hoog risico".

In 2020 publiceerde het Weense onderzoeksbureau Enco in opdracht van de Nederlandse overheid een rapport waarin wordt gesteld dat kernenergie niet duurder hoeft te zijn dan wind- of zonnestroom. Eerdere rapporten stelden dat kernenergie duurder was dan wind- of zonnestroom, deze rapporten hielden volgens Enco echter onvoldoende rekening met de hoge investeringen in het elektriciteitsnet ten behoeve van het aansluiten van grote aantallen zonne- en windparken.

Kernfusie.

Er wordt al tientallen jaren onderzoek gedaan naar kernfusie, vooral omdat de hierbij gebruikte grondstoffen (zware waterstof, of deuterium) in nagenoeg onbeperkte hoeveelheden uit zeewater kunnen worden gewonnen. Het blijkt echter niet

makkelijk om omstandigheden te scheppen waaronder waterstofkernen zo dicht bij elkaar worden gebracht en gehouden dat er een waarneembare hoeveelheid fusie-energie ontstaat. Er wordt onder andere gewerkt aan tokamak-reactoren en laser-implosiereactoren.

Problemen zijn de grote benodigde energie-input voor er netto energieproductie op gaat treden en de materialen waaruit de reactor moet bestaan. Deze moeten extreem sterk zijn en bestand zijn tegen hoge temperaturen. Bovendien worden ze na gebruik zelf radioactief, wat weer een nieuw afvalprobleem scheidt. Dit afval zal echter redelijk snel zijn radioactiviteit verliezen (de helft minder radioactief na 12 jaar), zodat opslag maar voor een beperkte periode nodig is.

Tevens wordt er gewerkt aan materialen die niet of minder radioactief worden door bestraling.

U_ziet wel dat op Duitsland na, zijn wij het meest achterlijke land op het gebied van gebruik van kernenergie. En dat voor een land dat ooit een eigen gasbel had die ons nog vele jaren van energie zou hebben kunnen voorzien ware het niet dat de politiek (de linkse politiek maar weer eens) die bel heeft verkwanseld door de productie tot onaanvaardbare hoogte op te vergroten waardoor we met het huidige probleem van de aardbevingen in het wingebed kwamen te zitten. En is dat geld besteed aan ontwikkelingen op het gebied van Kernfusie? Nee met dat geld is gestrooid door de politiek om mensen gunstig te stemmen. Die zouden uit dankbaarheid wel op die linkse partijen gaan stemmen...

Dat politici een vaak kwalijke rol spelen is echt niet van deze tijd alleen.

In de Tweede Wereldoorlog naderden de Amerikanen steeds meer het Japans moederland en de jappen zetten alles in wat ze maar hadden om die gehate Yanks tegen te houden: zelfmoordpiloten zowel in de lucht als in het water waren

daar een onderdeel van. Amerikaanse onderzeeërs werden vooral bestreden met een heel effectief wapen: de diepte-bom. Deze waren afgesteld te exploderen op een hoogte waarvan de Japanners wisten dat de boten zich verplaatsten. In werkelijkheid voeren deze boten echter dieper zodat het effect van de Japanse bommen slechts gering was.

Een Amerikaans senator die bij zijn bezoek aan de marine hierover was ingelicht kon het niet laten om na afloop van zijn bezoek aan de pers te melden dat de onderzeebootbemanningen redelijk veilig konden opereren omdat de Jappen hun bommen te hoog lieten exploderen. Dat haalde de radio en de krant. Binnen de kortste keren wisten ook Jappen dat ze misleid waren en pasten de detonatie diepte rap aan. Niet bekend is hoeveel mensen dat het leven heeft gekost maar wel is zeker dat het ook toen al ging om politiekbedrijvers die er niet tegen opzagen om slechts aan hun persoonlijk gewin te denken en niet hun (als het al aanwezig was) verstand gebruikten.

Uit dien hoofde is het goed om linkse tegenstanders van kernenergie met argusogen te beschouwen.

2 Kernsplijting

Er wordt wat dieper op de verschillen processen ingegaan gezien het belang om iets van de achtergrond te begrijpen die aan kernenergie ten grondslag licht.

Het is in de natuurkunde een proces waarbij een zware onstabiele atoomkern zich deelt of splijt in twee of meer lichtere kernen, waarbij aanzienlijke hoeveelheden energie vrijkomen. Dit principe wordt bijvoorbeeld toegepast om energie op te wekken in een kerncentrale, en helaas ook in kernwapens.

Het splijtingsproces werd in 1938 ontdekt door Otto Hahn, Fritz Strassmann en Lise Meitner in Berlijn.

Kernreacties

Bij scheikundige reacties blijft de hoeveelheid van ieder scheikundig element precies behouden: dit is een formulering van de wet van Lavoisier. Transmutatie in de klassieke zin van de alchemisten is daardoor onmogelijk. Op microscopisch niveau betekent dit dat de aard van een atoomkern tijdens de reactie niet wijzigt.

In 1917 slaagde Ernest Rutherford erin een kleine hoeveelheid stikstof in zuurstof te veranderen door een aanhoudend bombardement met alfadeeltjes (heliumkernen). Hiermee was de eerste kunstmatige transmutatie een feit.

In 1932 beschoten Ernest Walton en John Cockcroft kernen van een lithiumisotoop met protonen (waterstofkernen), waarbij telkens twee alfadeeltjes ontstonden.

Zij wonnen de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1951 voor wat populair bekend raakte als "atoomsplijting", hoewel het niet om

dezelfde soort reactie ging als bij de later ontdekte splitsing van uranium.

Ontdekking van kernsplijting

Enrico Fermi en zijn medewerkers waren in 1934 de eersten die uranium met neutronen beschoten. Er ontstonden stoffen met andere chemische eigenschappen en deze werden als zogenaamde transuranen geduid: elementen met atoomnummers groter dan dat van uranium. Hoewel in 1934 de mogelijkheid van uiteenvallen van zware atoomkernen in grotere brokstukken na de beschietingen met neutronen al door Ida Noddack werd geopperd, werd dit bij gebrek aan een theoretische onderbouwing toch voor onmogelijk gehouden.

Aanvankelijk zette Otto Hahn de experimenten van Fermi gezamenlijk met Lise Meitner en zijn assistent Fritz Strassmann voort. In juli 1938 moest de joodse Meitner Nazi Duitsland echter ontvluchten. Haar Oostenrijks paspoort werd door het Naziregime ongeldig gemaakt, en het was haar verboden meer dan tien rijksmark op zak te hebben. Hahn gaf Meitner zijn moeders diamanten ring mee op haar vlucht, zodat ze een grenswachter zou kunnen omkopen. Ze gebruikte die uiteindelijk niet: met de hulp van Nederlandse wetenschappers wist ze de grens over te komen. Uiteindelijk bereikte ze Zweden en vond daar veiligheid.

In Duitsland gingen Hahn en Strassmann zonder haar verder, en verliet het verdere contact met haar per brief.

De aanzet van de ontdekking van kernsplijting was dat er een radioactieve stof werd gevormd die chemisch identiek bleek te zijn met barium, atoomnummer 56, wat tot dan toe dus voor onmogelijk werd gehouden. Met behulp van aanwijzingen van Meitner werd het beslissende experiment op 17 december 1938 uitgevoerd en stelde Hahn definitief vast dat er kernsplijting had plaatsgevonden. De resultaten werden op 6 januari 1939 door Hahn en Strassmann in Die Naturwissenschaften gepubliceerd. Een brief (gedateerd 16 januari 1939) met een eerste theoreti-

sche verklaring door Meitner en haar neef Otto Frisch verscheen op 11 februari 1939 in Nature.

Gevolgen

Op 16 januari 1939 arriveerde Niels Bohr uit Kopenhagen in de Verenigde Staten om verscheidene maanden in Princeton door te brengen. Hij was vooral gekomen om enkele abstracte problemen met Albert Einstein te bespreken. Net voor hij Denemarken verliet hadden Otto Frisch en Lise Meitner hem verteld over hun idee dat de absorptie van een neutron door een uraniumkern soms ertoe leidde dat die kern in twee ongeveer gelijke delen splitste, waarbij enorm veel energie vrijkwam, een proces dat al spoedig 'kernsplijting' werd genoemd (volgens George Gamow stond de informatie in een telegram dat Meitner op 27 januari naar Bohr had gestuurd).

Meteen na zijn aankomst in de VS gaf Bohr dit idee door aan zijn voormalige student John Wheeler en anderen op de Universiteit van Princeton, en van daaruit werd het mondeling doorgegeven en bereikte ook Enrico Fermi op de Universiteit van Columbia.

Als gevolg van conversaties tussen Fermi, John R. Dunning, en George B. Pegram werd toen op Columbia gezocht naar de sterke ionisatiepulsen die verwacht werden bij de zware rondvliegende fragmenten van een uraniumkern.

Op 26 of 27 januari 1939 organiseerden de George Washington-universiteit en het Carnegie Institute of Technology gezamenlijk een conferentie over theoretische natuurkunde in Washington, D.C. Fermi kwam voor deze bijeenkomst over uit New York voordat de splijtingsexperimenten in Columbia waren verricht. Na de bijeenkomst discussieerde Fermi met Bohr over kernsplijting, en Fermi noemde daarbij specifiek de mogelijkheid dat hierbij ook neutronen vrij zouden kunnen komen. Hoewel dit maar een gok was, was de implicatie daarvan, namelijk het mo-

gelijk kunnen bestaan van een kettingreactie, aan insiders met-een duidelijk.

Nog tijdens de bijeenkomst had Enrico Fermi aan de andere deelnemers een aantal formules in verband met kernsplijting gepresenteerd. Toen een journalist van een Washingtonse krant al te ijverig notities maakte, werd hij door Merle Tuve naar buiten gewerkt, maar wat hij had gehoord, verscheen in de kranten. De volgende ochtend kreeg George Gamow al een interzonaal telefoontje uit Californië van Robert Oppenheimer, die graag wilde weten wat dit allemaal betekende.

Al voordat het congres in Washington was afgelopen waren er verschillende andere experimenten in gang gezet om het bestaan van kernsplijting te bevestigen, en uit vier verschillende laboratoria (universiteit van Columbia, het Carnegie Institution of Washington, Johns Hopkins-universiteit en de Universiteit van Californië) werd bevestiging gepubliceerd in het nummer van 15 februari van *Physical Review*.

Rond deze tijd had Bohr ook gehoord dat vergelijkbare experimenten rond 15 januari in zijn eigen laboratorium in Kopenhagen hadden plaatsgevonden. Frédéric Joliot-Curie in Parijs had ook zijn eerste resultaten gepubliceerd in de *Comptes Rendus* van 30 januari 1939. Vanaf dit moment verscheen er een niet aflatende stroom van publicaties over kernsplijting, zodat tegen de tijd dat J. Turner, van Princeton, een overzichtsartikel schreef in *Reviews of Modern Physics* op 6 december 1939, er al haast 100 publicaties beschikbaar waren. Een volledige analyse en bespreking van deze artikelen verscheen in het artikel van Turner en elders.

De betrokken onderzoekers hadden zich al vroeg gerealiseerd dat kernsplijting zou kunnen worden toegepast voor het opwekken van energie en voor het creëren van bommen. Tijdens de Tweede Wereldoorlog legden zowel de geallieerden als de Duitsers zich toe op de militaire toepassing van kernsplijting. Het

was uiteindelijk het Manhattanproject van de Verenigde Staten, met Canadese en Britse medewerking, dat in 1945 de atombommen opleverde waarmee de Amerikaanse luchtmacht Hiroshima en Nagasaki in de as legde.

De stabiliteit van een atoomkern wordt bepaald door de sterke kernkracht. Op grond van louter elektromagnetische kracht zou de kern, die uitsluitend uit neutronen en protonen bestaat, uit elkaar gerukt worden door de onderlinge afstoting van de positief geladen protonen.

Gestimuleerde kernsplijting treedt op wanneer in een laboratorium, in een reactor of in een wapen atoomkernen worden beschoten met andere deeltjes zoals neutronen.

Spontane kernsplijting betekent dat een atoomkern van nature onstabiel is en zichzelf ontbindt in kleinere kernen. Natuurlijke radioactiviteit is het gevolg van spontane kernsplijting bij elementen die in de natuur voorkomen.

Sterke kernkracht

De sterke kernkracht is op zeer kleine schaal verantwoordelijk voor de interne structuur van kerndeeltjes (protonen en neutronen), die telkens uit 3 quarks bestaan. Ze blijft echter in kleinere mate voelbaar op de grotere schaal van interactie tussen kerndeeltjes onderling, in de vorm van de Yukawa-potentiaal. Het blijkt dat de stabielste isotopen een kern hebben die bestaat uit een even aantal protonen en een even aantal neutronen. Andere configuraties, vooral de combinatie van een oneven aantal protonen met een oneven aantal neutronen, vallen spontaan uit elkaar of zijn relatief gemakkelijk te splijten. Hieruit volgt dat de kern van Uranium-236, die uit 92 protonen en 144 neutronen bestaat, erg stabiel is. Spontane splijting van deze isotoop komt dus zelden voor. Daarentegen is het juist de toevoeging van een neutron aan een kern van Uranium-235, dus met precies dezelfde configuratie van protonen en neutronen, die resulteert in de klassieke splijting van uranium in kernreactoren.